

Comparativo Entre os Processos de Aspersão Térmica na Manutenção

Eder Jr França dos Santos
Leandro Bonfante Toledo
Marcelo da Silva Carrilho

eder.santos@bol.com.br
engenhar@illbruck.com.br
marcelo.carrilho@sandvik.com
gimenes@infosolda.com.br

Orientador: Profº Luiz Gimenes Jr.

1 – RESUMO

A aplicação de revestimentos protetores através da Aspersão Térmica, tem o objetivo de reduzir os custos relativos a construção e a recuperação de peças / equipamentos, além de propiciar um grande aumento nas propriedades físico-metalúrgicas.

Este trabalho demonstra, através da análise dos processos de Aspersão Térmica, os indicativos que influenciam na escolha do processo adequado ao tipo de recuperação, reduzindo tempo de pesquisa e evitando a contratação de serviços que não correspondem as necessidades físico-metalúrgicas das peças / equipamentos.

1 - ABSTRACT

The protective covering application through the Thermal Spraying, has the objective to reduce the relative costs the construction and the recovery of parts/equipment, besides propitiating a great increase in the physic-metallurgical properties.

This work demonstrates, through the analysis of the processes of Thermal Spraying, the indicative that influence in the choice of the adequate process to the type of recovery, reducing research time and preventing the act of contract of services that do not correspond the physic-metallurgical necessities of the parts/equipment.

2- INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos protetores aplicados através da Aspersão Térmica (AT) tem o objetivo de diminuir as taxas de desgaste e aumentar a resistência à corrosão dos materiais, peças, e componentes estruturais. Também é utilizada em peças que requeiram isolamento térmico e isolamento elétrico.

3 - HISTÓRICO

A AT desenvolveu-se, a partir de 1910, tendo como seu precursor M.U. Schoop de Zurique, Suíça, que apresentou o primeiro sistema de metalização, utilizando um equipamento que empregava arames metálicos como consumíveis, com alimentação uniforme através de ar comprimido e fusão do metal por meio de chama à gás.

Em 1940, foi desenvolvido outro tipo de pistola que utiliza o calor gerado por um arco voltaico, entre as pontas dos dois arames, para a fusão do consumível. Na década de 60, foi desenvolvido o processo de aplicação por arco plasma, e mais tarde, o processo de deposição de pós por detonação.

Nos anos 80 foi desenvolvido o sistema a chama com pistola hipersônica, permitindo com isto transferir as partículas aspergidas à elevada velocidade. A partir da década do 90, o avanço da indústria de equipamento e

materiais para aspersão térmica é muito grande, otimizando os equipamentos em quanto a projetar a maior velocidade as partículas aspergidas, utilizando gases de transporte que não contaminam ou oxidam as partículas após fusão. Hoje as velocidades das partículas projetadas alcançam 5000 m/s.

Através da **figura 1**, pode-se tomar conhecimento da cronologia e do desenvolvimento crescente da indústria da AT.

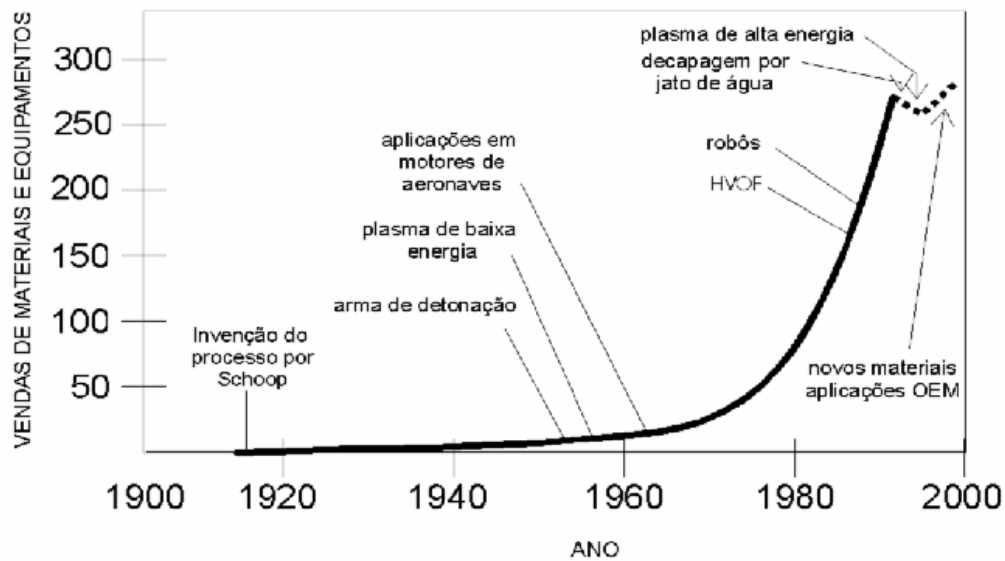


Figura 1 - Desenvolvimento da Indústria de AT.

Fonte: THORPE, M.L, Thermal Spray, Advanced Materials & Process, v.143, N°5, pag 50-61, 1993

4 – PROCESSOS

Basicamente a AT consiste de um grupo de processos por meio dos quais se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camadas de materiais metálicos ou não metálicos. As principais características da AT, no que concerne ao aspecto típico das camadas depositadas, são esquematicamente apresentadas na **figura 2**.

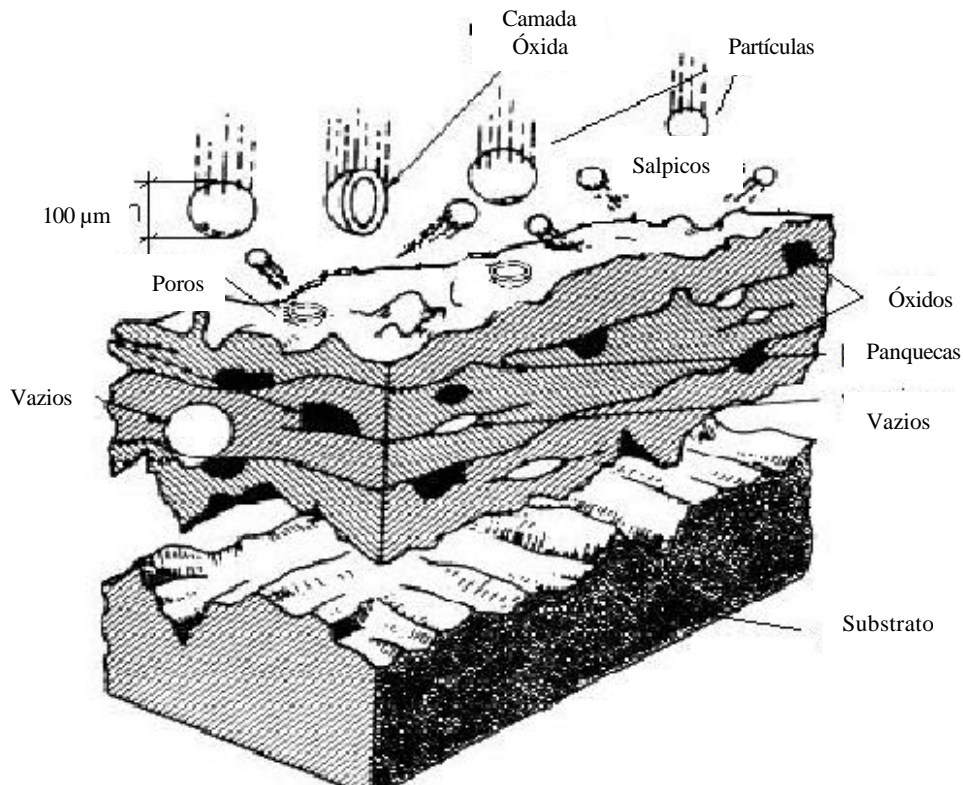


Figura 2 - Interfaces da superfície durante a AT

Fonte: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>

Nos processos de AT, os materiais de deposição são fundidos ou aquecidos em uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada por meio de combustão de gases, de arco elétrico ou por plasma. Imediatamente após a fusão, o material finamente atomizado é acelerado por gases sob pressão contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou semi-fundido. Ao se chocarem contra a superfície, as partículas achatam-se (panquecas) e aderem ao material base e na seqüência sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas são constituídas de pequenas partículas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura típica lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade.

De acordo com esta definição qualquer material que não se decomponha quando fundido pode ser utilizado como revestimento. Na prática uma grande quantidade de materiais incluindo a maiorias dos metais e suas ligas, materiais cerâmicos, carbonatos, boretos e hidretos são depositados por aspersão térmica.

Geralmente nos processos de AT de uso industrial as distâncias de projeção das partículas variam de 100 até 300 mm e para obter uma aderência adequada ao substrato, este deve ter um grau de limpeza SIS Sa3. Na AT a limpeza é obtida através do jateamento abrasivo, permitindo com isso obter no substrato limpeza e rugosidade, que permitem o

ancoramento mecânico das partículas no momento do impacto. O processo de AT ASP admite um grau de limpeza SIS Sa2.5 da superfície a ser aluminizada sem prejudicar a aderência das partículas ao substrato no momento do impacto.

Os processos de AT de maior utilização industrial são classificados em função dos métodos de geração da energia: energia elétrica ou combustão. Na figura 3, podemos observar a genealogia dos processos de AT.

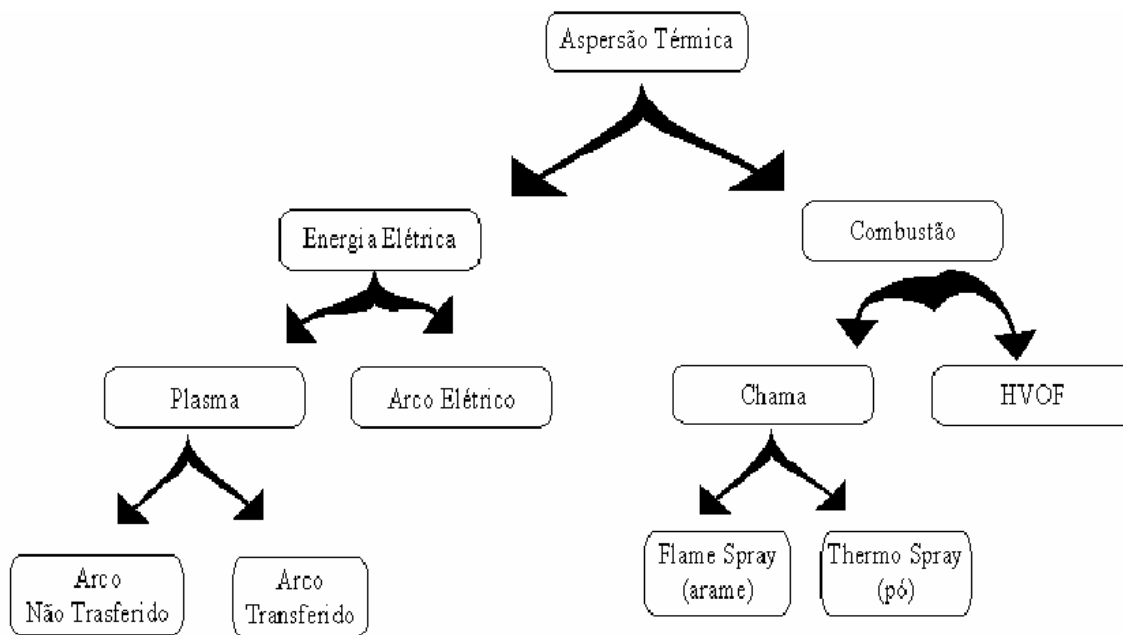


Figura 3 - Genealogia da AT

Fonte: ABS - Associação Brasileira de Soldagem - Curso de Metalização, 36p , 1994

4.1 Processo por Detonação

Processo que utiliza a energia da explosão de uma mistura oxiacetilênica que aquece e impele o material, sempre sob forma de pó, de encontro à superfície do substrato a ser revestido. As camadas resultantes deste processo são extremamente duras, densas e firmemente aderidas ao material de base.

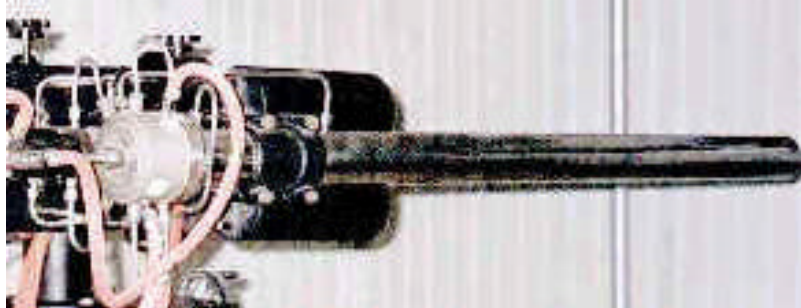


Figura 4 - Pistola para AT por Detonação
Fonte: <http://www.dl-plasma.com/baozhaE.htm>

A **figura 4**, apresenta uma pistola para aplicação pelo processo de detonação. Ela consta, basicamente, de um corpo em forma de barril alongado, no interior do qual introduz-se a mistura de oxigênio, gás combustível e pó do material de revestimento. Quando se produz a ignição, por meio de uma vela apropriada, da mistura de gases, uma onda controlada de detonações, aquece e acelera as partículas do pó, expulsando-as do barril. A velocidade de saída das partículas pode atingir até 760 m/s mais do dobro da velocidade do som no ar.

Múltiplas detonações a cada segundo, permitem a deposição das camadas até a espessura desejada, enquanto a peça é girada ou passada em frente da pistola.

Temperaturas da ordem de 3300°C são atingidas pela pistola de detonação ao passo que o substrato é mantido em torno de 150°C por um sistema de refrigeração com dióxido de carbono.

As espessuras de camadas possíveis de se depositar, situam-se entre 0,05 e 12mm.

A altíssima velocidade imprimida às partículas produz elevada energia cinética que se libera no instante do choque com o substrato, resultando em excelente grau de adesão da camada ao material base.

4.2 Processo à Laser

Processo também conhecido como PROTAL (Projeção Térmica Assistida por Laser), combina a limpeza, ativação e faixas de camada em uma única operação, tornando mais rápido, econômico e menos prejudicial ao ambiente do que processos convencionais.

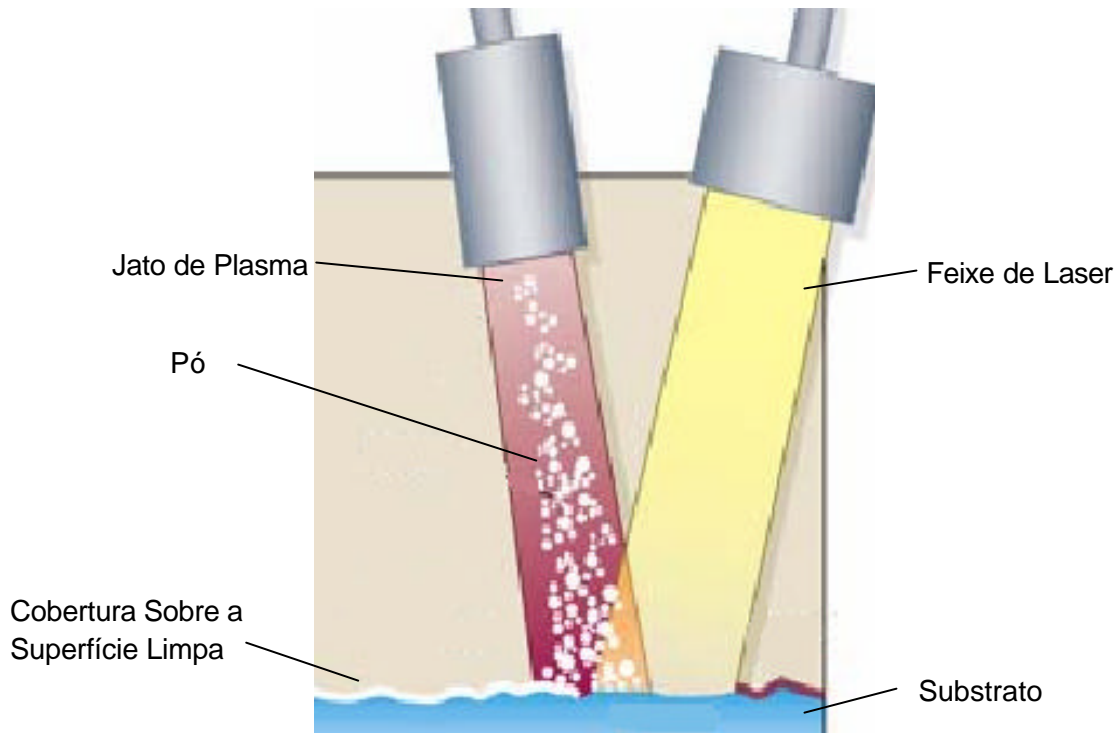


Figura 5 - Esquema da AT pelo processo Laser

Fonte: <http://www.industrial-lasers.com/archive/2000/11/1100fea2.html>

Desenvolvido pelo Prof. Coddet Cristão do Institut Polytechnique - França. Foi assumido em 1996 pela Sulzer Metco. Os primeiros resultados foram apresentados em 1998. Atualmente está pronto para comercialização e a Sulzer Metco detém os direitos mundiais além do marketing do respectivo processo.

Neste processo, o substrato é limpo com um pulso de laser de alta-energia. Um feixe de laser com um comprimento de onda de $1.064 \mu\text{m}$ e uma duração de pulso de somente 10 ms, evapora a camada de graxa, separa o óxido que se estende em camadas e remove a camada atômica superior por meio de separação, sem aquecer o metal base a um grau apreciável. A área de impacto do laser normalmente é $18 \times 8 \text{ mm}$. Uma

área de superfície de 1 m^2 pode ser tratada com uma densidade de energia de 1.5 J/cm^2 em um minuto. Alguns nanômetros do substratos são afastados com este processo. O resultado ativa a superfície que pode ser coberta por AT à Chama de Alta Velocidade com materiais cerâmicos ou metálicos.

Com este processo, a diferença está no tempo, entre a preparação da superfície e a AT propriamente executada. Dependendo do substrato, uma redução na força adesiva já implica em resultados da ordem de 100 ms, assim a camada deve ser aplicada imediatamente depois de tratamento de laser. Por isto, o laser ótico é acoplado com uma tocha de

protoplasma e montado em um robô, conforme podemos observar na **figura 6**.



Figura 6 - Robô equipado com tocha protoplasma e laser ótico
Fonte: <http://www.industrial-lasers.com/archive/2000/11/1100fea2.html>

A eliminação de solvente e do jateamento são cruciais para determinar este processo como ecologicamente correto, além do baixo consumo de energia, aproximadamente 3 kW.

4.3 Processo à Chama Oxiacetilênica

Processo que utiliza o calor gerado pela combustão de uma mistura de gases (oxigênio-acetileno ou oxigênio-propano) para fundir o material de deposição. Os materiais para revestimentos podem utilizar-se sob a forma de pó ou arame (sólido e tubular) e ser metais e ligas metálicas, materiais cerâmicos e alguns plásticos.

Nas figuras 7 e 8 são mostrados os componentes básicos de um equipamento de AT, que essencialmente segue o equipamento desenvolvido por

Schoop; os cortes dos bicos das pistolas, destacam-se as variantes com consumível na forma de pó ou arame. A mistura dos gases no bico da pistola produz a combustão, que permite apenas fundir o material e não é utilizada para transferir as partículas contra o substrato. Para isso se utiliza normalmente jato de ar comprimido que atomiza o metal fundido e o projeta até o substrato.

Quando é utilizado material de aporte na forma de pó, este é alimentado para a pistola geralmente por gravidade, conforme podemos observar na **figura 7**, onde as partículas contêm mínima velocidade no momento do encontro com a chama que as funde, no instante, o jato de ar comprimido as projeta contra o substrato. Normalmente, as velocidades de transferência são baixas, portanto, a aderência do material depositado é fraca.

Quando é utilizado arame, este é alimentado de forma contínua, conforme ilustra a **figura 8**, até o bico de combustão por uma turbina movida geralmente a ar comprimido, as velocidades de transferência das partículas fundidas são maiores, permitindo ao ar comprimido transferi-las com maior velocidade (maior energia cinética) até o substrato. Esta energia é aumentada pelo ar comprimido de duas maneiras:

- distribuem os gases combustíveis ao redor do arame para uma fusão uniforme e,
- asseguram o tempo suficiente de permanência do arame na chama para uma fusão eficiente, mesmo



utilizando-se velocidades do ar comprimido elevadas.

As principais variáveis que devem de ser reguladas neste processo são: pressão e fluxo de ar comprimido, utilizado para transferir as partículas da fonte de calor até o substrato e para fornecer à turbina a pressão suficiente para alimentar com arame o bico da pistola e, o fluxo de acetileno e oxigênio para formar e manter a chama (neutra) que permite a fusão do material. Neste processo as partículas oxidam, pelo oxigênio contido no ar, prejudicando isso a aderência. Pode-se, também, utilizar para o transporte das partículas gás inerte em lugar de ar comprimido para minimizar a oxidação.

Figura 7 - Pistola de AT à Chama Oxiacetilênica - alimentada com pó através da gravidade

Fonte: <http://www.gordonengland.co.uk/cps.htm>

Figura 8 - Pistola de AT à Chama Oxiacetilênica - alimentada com arame contínuo

Fonte:

<http://www.gordonengland.co.uk/cws.htm>



4.4 Processo por Arco Elétrico

Processo que utiliza um arco elétrico como fonte de calor para fundir o arame de deposição. O arco elétrico é obtido por diferencial de potencial no bico de uma pistola onde chegam 2 arames do material de deposição. Forte jato de ar comprimido é dirigido ao arco elétrico, na região onde se funde o material, atomizando-o e projetando-o contra o substrato.

Na **figura 9** são mostrados os componentes normais de um equipamento a arco elétrico e um esquema da pistola, onde o ar comprimido atua em forma concêntrica: (A) ar comprimido primário e (B) ar comprimido secundário.

Na atualidade as pistolas de AT por arco elétrico utilizadas são de bico fechado e tem a proteção do jato de ar comprimido secundário, cuja aerodinâmica impede que as partículas se aglomerem em seu trajeto até o substrato.

O acionamento do mecanismo de alimentação contínua do arame pode ser feito por meio de pequena turbina movida a ar comprimido ou por motor elétrico. A velocidade de projeção de partículas atinge até 250 m/s. Na unidade de controle é ajustada a alimentação dos arames, o suprimento de ar comprimido e a energia elétrica.

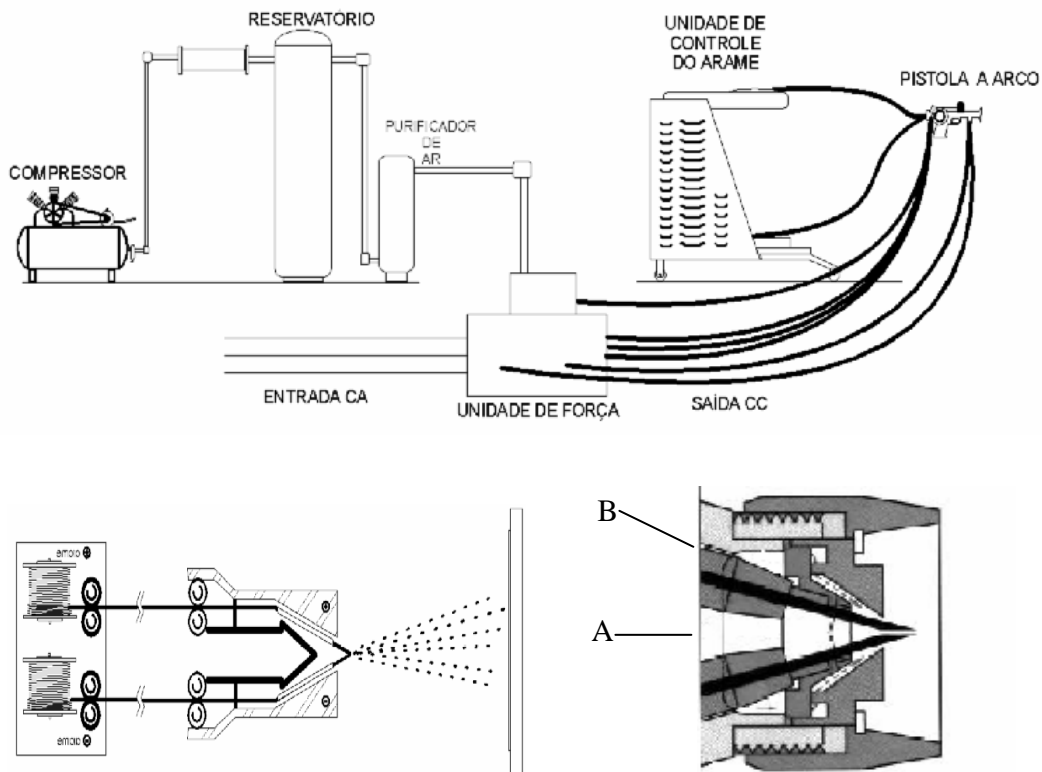


Figura 9 - Componentes para AT por Arco Elétrico
 Fonte: HOWARD, Larry , Modern welding technology, 4th edition

4.5 Processo à Chama de Alta Velocidade

Neste processo, o calor gerado na combustão utiliza uma mistura de oxigênio com gases combustíveis (propileno, propano ou querosene), a chama atinge temperaturas na faixa entre 2700 e 3100 °C.

No caso da utilização de pó como material de deposição a sua alimentação é feita de forma concêntrica ao bico da pistola, utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico o pó é atomizado no passo por uma câmara quente tipo venturi, sendo portanto, além de aquecido o pó, aumentada sua velocidade. Logo, atravessa com elevada velocidade a chama. O pó não funde, devido ao curto tempo que estas ficam na fonte de calor, apenas são aquecidas, permitindo com isto um aumento significativo da energia cinética das partículas, logo, no momento do impacto contra o substrato,

estas transferem elevada energia (cinética + impacto = elevado calor).

As camadas por exemplo de alumínio (pó) depositadas por este processo se caracterizam por manter a forma original das partículas (levemente deformadas) quando depositadas no substrato, até o momento é o processo que permite obter a maior aderência e a menor porosidade. Sendo que os poros ficam concentrados entre as partículas maiores e entre as que rompem pelo impacto no substrato.

O equipamento utilizado observa-se na **figura 10**, onde a velocidade de projeção das partículas pelo jato de transferência (fluxo nitrogênio + propagação da chama) podem atingir até 1200 m/s, sendo conhecido como processo supersônico. Na atualidade pistolas mais modernas que permitem gerar velocidades dos gases que transferem as partículas entre 3200 e 5000 m/s.

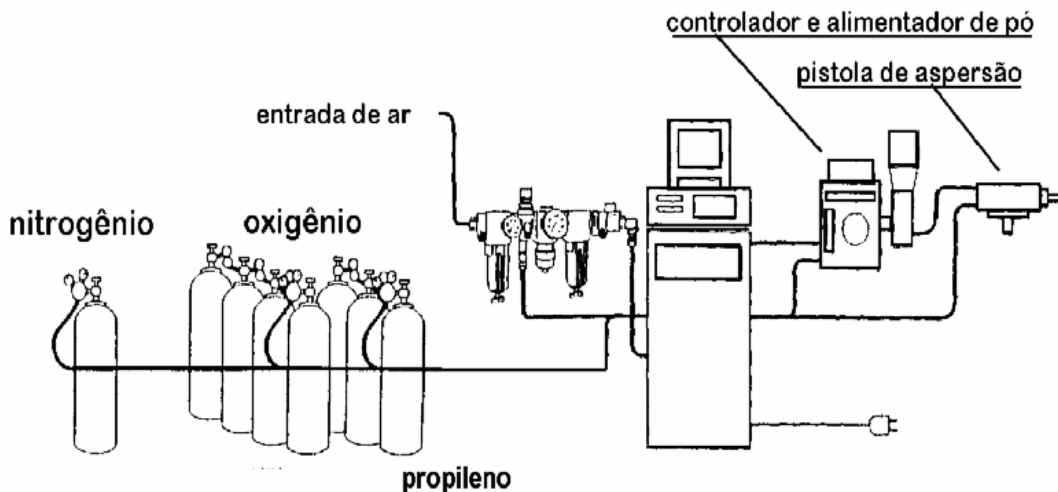


Figura 10 - Equipamento para AT à Chama de Alta Velocidade
Fonte: HOWARD, Larry , Modern welding tecnologia, 4th edition

4.6 Processo à Plasma

A necessidade de um processo capaz de aplicar materiais oxi-cerâmicos e carbetos, que exigem temperaturas acima das obtidas através dos processos tradicionais, originou o processo à Plasma, que criou uma nova família de materiais e técnicas de deposição para enorme gama de aplicações industriais. Neste processo utiliza-se materiais consumíveis exclusivamente sob a forma de pó.

Em um equipamento para AT à Plasma, conforme **figura 11**, ocorre a passagem do fluxo de gás ou mistura de gases através de um arco elétrico anular que se forma entre um eletrodo central de tungstênio (cátodo) e o orifício de um bico de cobre (ânodo). O gás é aquecido nesse arco elétrico, até temperaturas muito altas, bem acima do que se conseguiria na combustão. A ionização se processa com este superaquecimento, dando origem ao

plasma.

Na saída do bico da pistola, átomos das moléculas dos gases diatômicos que foram dissociadas na passagem pelo arco elétrico, reúnem-se novamente para formar a molécula de gás, que é sua estrutura natural. Durante a recombinação dos átomos, é liberada a energia tomada anteriormente no arco elétrico para a dissociação, criando-se uma zona de altíssima temperatura, onde injeta-se o pó que é fundido, superaquecido e acelerado com altas velocidades ao encontro do substrato. O conteúdo de energia, temperatura e velocidade do jato de plasma é controlado pelo tipo de bico empregado, pela corrente elétrica, pelo balanceamento da mistura de gases e pelo fluxo destes gases.

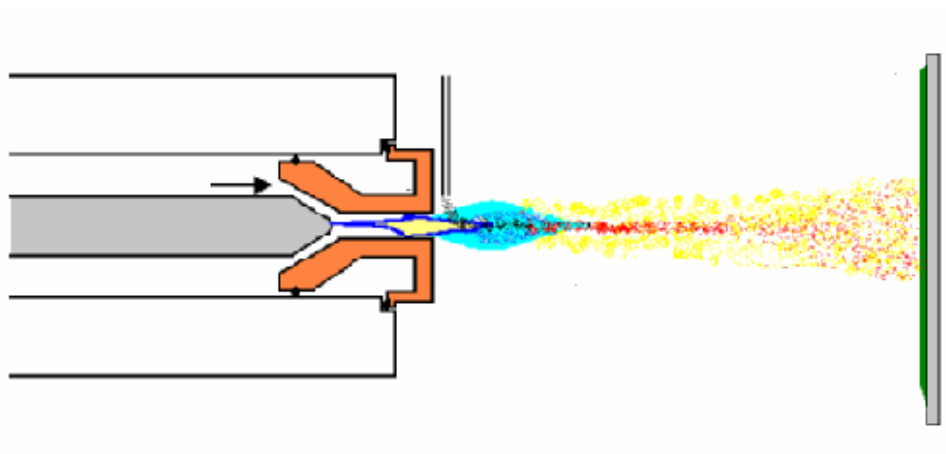


Figura 11 - Esquema da pistola de AT à Plasma

Fonte: <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>

A energia dissipada pelo processo pode ser observada na figura 12, que demonstra o exato momento de aplicação da AT pelo processo à Plasma.

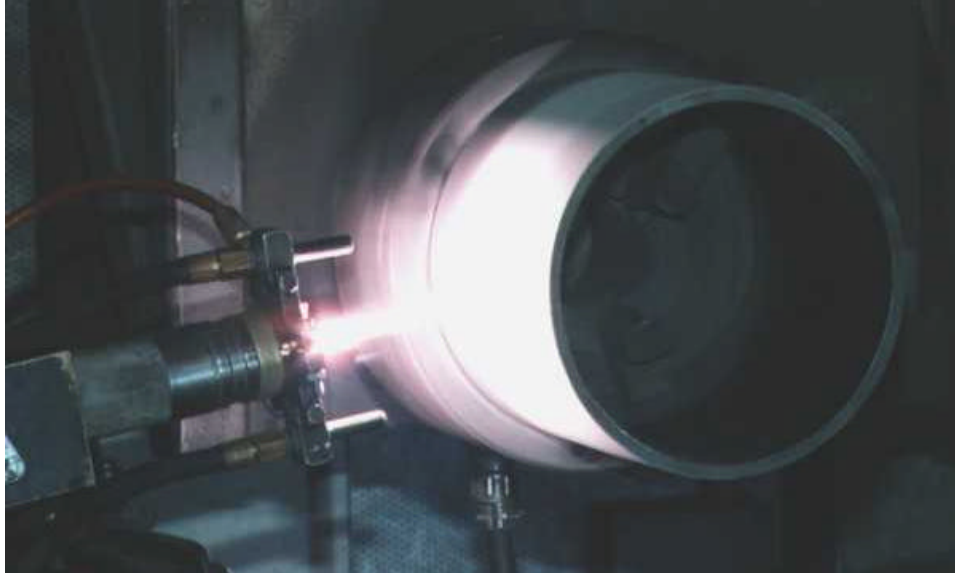


Figura 12 - Energia dissipada na aplicação da AT pelo processo à Plasma.
Fonte: <http://www.gordonengland.co.uk/ps.htm>

5 - COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS

Como podemos observar na tabela abaixo, o nível de tecnologia dos processos de AT está diretamente relacionado a qualidade atingida e conseqüentemente ao custo.

Processos	Características							
	Tipo de Consumível	Temperatura Média (°C)	Velocidade de Impacto (m/s)	Taxa de Deposição Máxima (kg/h)	Potência (kW)	Vazão de Gases (m³/h)	Aderencia Relativa (1 a 10)	Custo Relativo (1 a 10)
Detonação	Pó	3900	910	1	185	11	8	10
Laser	Pó	8300	800	18	150	10	8	10
Chama Oxiacetilênica	Arame	2800	180	9	75	71	4	3
	Pó	2200	30	7	50	11	3	3
Arco Elétrico	Arame	5500	240	16	5	71	6	1
Chama à Alta	Pó	3100	835	14	185	43	8	5

Velocidade Plasma	Pó	8300	435	10	75	8,4	9	10
--------------------------	----	------	-----	----	----	-----	---	----

Fonte: Adaptado de : Marques, Paulo V. , Aspersão Térmica, Soldagem & Inspeção, Rio de Janeiro n°10, Dez/2000, pag.26

5.1 Vantagens dos Processos

Detonação	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente coesão; • Camada com baixo índice de porosidade; • Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores.
Laser	<ul style="list-style-type: none"> • Elimina a necessidade de limpeza; • Reduz a probabilidade de contaminação da peça; • Reduz o custo.
Chama Oxiacetilênica	<ul style="list-style-type: none"> • Permite a aplicação de 3 tipos de camadas: <ul style="list-style-type: none"> -Ligas para camadas fundidas, resistentes à corrosão e oxidação. -Ligas com carbetos, recomendados para condições de abrasão são severas. -Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão, funcionam como isolantes térmicos e elétricos
Arco Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Maior aderência; • Maior coesão entre partículas; • Maior velocidade de deposição chegando a aplicar 30Kg/h; • Materiais mais usados são: aço inóx martensítico, aço inóx austenítico, bronze, alumínio, níquel, cobre, molibdênio, carbetos, etc.
Chama à Alta Velocidade	<ul style="list-style-type: none"> • Menor porosidade; • Maior dureza; • Menor quantidade de óxidos; • Melhor resistência ao desgaste; • Maior adesão
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> • Propriedades físicas e metalúrgicas das camadas depositadas superiores às aplicadas pelos outros processos; • Porosidade reduzida; • Melhor aderência; • Menor conteúdo de óxido;

5.2 Desvantagens dos Processos

Detonação	<ul style="list-style-type: none"> • Operações devem ser automatizadas; • Operações devem ser controladas a distância; • Ambiente necessita proteção acústica; • Altíssimo ruído, acima de 150 decibéis.
Laser	<ul style="list-style-type: none"> • A camada deve ser aplicada imediatamente depois de tratamento de laser; • Necessária a utilização de um sistema robotizado.
Chama Oxiacetilênica	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido; • Prejudicando a aderência; • Necessário o uso de gás inerte para transporte das partículas.
Arco Elétrico	Idem ao processo Chama Oxiacetilênica.
Chama à Alta Velocidade	<ul style="list-style-type: none"> • Devido utilização dos combustíveis (propileno, propano ou querosene), requer maior atenção a segurança da instalação.
Plasma	<ul style="list-style-type: none"> • Melhor qualificação do operador; • Proteção extra ao operador, devido a energia liberada.

6 - APLICAÇÃO DA AT NA MANUTENÇÃO

Diversos tipos de peças podem ser recuperados através da AT, a escolha do processo depende dos resultados e do tipo de reparo que se deseja obter. Abaixo temos uma breve relação dos tipos mais comuns de peças:

Anéis	Industria Metalúrgica
Moldes e Contra-Moldes	Industria Metalúrgica
Moldes e Contra-Moldes	Industria do Vidro
Formas	Industria Metalúrgica
Eixos Extrusores	Industria do Plástico
Engrenagens	Industria Metalúrgica
Guias de Máquinas	Industria Metalúrgica
Correntes Transportadoras	Industria Papel e Celulose
Blocos de Motor	Industria Metalúrgica
Pistões	Industria Metalúrgica
Camisas de Cilindros	Industria Metalúrgica
Eixos Propulsores	Industria Aeronáutica
Alojamentos de Rolamento	Diversas Aplicações
Mangas de Eixo	Industria Metalúrgica
Pistões Hidraulicos	Industria Metalúrgica
Mancais	Industria Metalúrgica
Eixos de Motores	Industria Metalúrgica
Pás de Exaustores	Industria Metalúrgica
Rolos de Laminação	Industria Metalúrgica
Rolos de Transporte	Industria Papel e Celulose
Turbinas para Geração de Eletricidade	Industria de Energia Elétrica

Fonte: 1. Visita Técnica à empresa APL Metalização
2. Catálogo Eutectic Castolin, Aplicações & Sistemas

Como podemos observar na tabela acima, as aplicações tem maior peso na indústria metalúrgica, porém com o avanço tecnológico na utilização de outros materiais, os processos de AT estão ganhando maior participação em outras áreas de atuação, como por exemplo indústria aero-espacial, indústria do papel e celulose, indústria do vidro.

7 - CONCLUSÃO

Com auxílio deste trabalho pudemos elucidar os processos de AT e dentre eles foi feito um comparativo e suas aplicações.

Podemos concluir que devido a evolução tecnológica na área de AT já é possível proteger eficazmente um determinado componente ou uma superfície exposta a qualquer tipo de desgaste.

As peças ou os equipamentos que estavam sujeito a falhas prematuras devido aos fenômenos de desgaste aos quais oneravam tanto às empresas a tempos atrás, tanto na tentativa de recuperação destas peças quanto na aquisição das mesmas, hoje com o domínio destes novos processos de AT já desenvolvidos, podemos ter uma maior melhoria na eficiência dos equipamentos, uma redução no custo dos equipamentos, aumento na vida útil das peças e ferramentas, melhores soluções de projetos de máquinas, uma diminuição do tempo de parada de equipamentos, etc.

Ficando assim claro que a AT se torna mais um processo vantajoso para as empresas, pois esta diretamente relacionada à alta qualidade atingida ao menor custo.



8 - BIBLIOGRAFIA

Livros / Publicações

American Welding Society, Hand book, 70th edition, Welding processes

American Welding Society, Thermal spraying, practice, theory and application, Miami, 1985, 170 pag

THORPE, M.L, Thermal spray, Advanced materials & process, v.143, N°5, pag 50-61, 1993

ABS - Associação Brasileira de Soldagem - Curso de Metalização, 36p , 1994

Marques, Paulo V. , Aspersão térmica, Soldagem & inspeção, Rio de Janeiro n°10, 2000, pag.21-26

HOWARD, Lary , Modern Welding Tecnology, 4th edition

Saraiva, Manuel, Apostiva solda de manutenção - Módulo revestimento, ABS

Catálogos / Informações Técnicas

Catálogo Eutectic Castolin, Aplicações & Sistemas

Visita Técnica à empresa APL Metalização

Sites Internet

<http://www.dppr.ctc.com>

<http://www.gordonengland.co.uk>

<http://www.efunda.com>

<http://www.industrial-lasers.com>

<http://www.ewi.org>

<http://setu.tutpse.tut.ac.jp>

<http://www.newtechcome.co.kr>

<http://www.dl-plasma.com>